DOI:10.11931/guihaia.gxzw202408038

亚热带人工混交林演替早期群落结构及其恢复特征

李艳朋[1]，杜健[2]，盘李军[3]，陈洁[1]，许涵[1*]

（1. 中国林业科学研究院热带林业研究所/海南尖峰岭森林生态系统国家野外科学观测研究站，广州 510520；2. 赣州市林业发展服务中心，江西 赣州 341000；3. 佛山市云勇林场，广东 佛山 528518）

摘　要：群落结构的恢复能力是判断人工混交林营建成功与否的重要指标。为探究人工混交林群落结构的恢复特征，该文以广东省佛山市云勇林场 2010 年对杉木纯林进行皆伐并种植阔叶乡土树种后形成的人工混交林为研究对象，通过分析 2020 年在典型区域建设的 7.92 hm² 样地群落调查数据，计算了物种多样性、重要值、径级结构和胸高断面积等指标。结果表明：（1）云勇林场样地在经过 10 年的自然恢复后，共有 47 科 101 属 136 种木本植物进入群落并成功定植且包含 78 种稀有种，表明亚热带人工混交林具有较强的物种多样性恢复能力。（2）云勇林场样地独立植株个体的平均胸径为 8.47 cm，植株径级分布总体呈现为倒"J"形，表明群落更新良好且处于相对稳定状态。此外，早期人为引入物种能够实现自然更新，但由于恢复时间较短，其径级结构主要表现为钟形曲线。（3）仅物种多度与胸高断面积表现为较强的显著正相关关系，其余物种多样性指标均与胸高断面积表现为显著负相关关系，表明人工混交林演替早期的胸高断面积仍主要由造林初期人为引入物种决定。随着人工混交林演替进程中共存物种间生态位互补性的逐渐增强，有望促进物种多样性与群落生产力的同步提升。综上所述，该文发现亚热带人工混交林具有较强的群落结构恢复能力，研究结果有助于为亚热带人工混交林的管理提供科学依据。

关键词：人工混交林，物种多样性，群落结构，胸高断面积，恢复特征

中图分类号：Q948　　　　**文献标识码**：A

Community structure and recovery characteristics of subtropical mixed plantations in early succession

LI Yanpeng[1], DU Jian[2], PAN Lijun[3], CHEN Jie[1], XU Han[1*]

(1. *Hainan Jianfengling National Key Field Research Station for Tropical Forest Ecosystem, Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry*, Guangzhou 510520, China; 2. *Ganzhou Forestry Development Service Center*, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 3. *Foshan Yunyong Forest Farm*, Foshan 528518, Guangdong, China)

Abstract: The resilience of community structure is important to the success of mixed plantation construction. This study was conducted in the subtropical mixed plantations formed after the renovation of pure forest of *Cunninghamia lanceolata* in 2010 in Yunyong Forest Farm, Foshan, Guangdong Province. To understand the restoration process of community structure and ecological function of subtropical mixed plantations, species diversity, importance value, diameter class structure and basal area at the breast height were calculated based on the 7.92 hm² plot which was set up in 2020. The results were as follows: (1) 136 woody plant species belonging to 101 genera and 47 families colonized the community after 10 years of natural restoration, including 78 rare species, indicating the subtropical mixed plantations had a strong conservation ability of

---

基金项目：中国林业科学研究院基本科研业务费专项（CAFYBB2021SY002，CAFYBB2022SY014，CAFYBB2021ZH002）；广东省基础与应用基础研究基金（2024A1515011100）；广东珠江三角洲森林生态系统国家定位观测研究站项目（0144135）。

第一作者：李艳朋(1990—)，博士，副研究员，主要从事森林生态学研究，（E-mail）lyp20130718@163.com。

*__通信作者__：许涵，博士，研究员，研究方向为森林生态学，（E-mail）ywfj@163.com。

species diversity. (2) The average diameter at breast height (DBH) of all individuals was 8.47 cm, and the DBH distribution showed an inverse-J shape. In addition, early artificially introduced species could achieve natural regeneration, although their DBH shapes showed bell curves due to the short recovery time. (3) There was a significant positive correlation between species abundance and basal area at the breast height, while other species diversity indices showed significant negative correlations with basal area at the breast height, indicating the basal area at the breast height was still determined by the artificially introduced species in the early succession of mixed plantations. With the increasing of niche complementarity among coexisting species, it is expected to promote the simultaneous improvement of species diversity and community productivity in the succession of mixed plantations. The results reveal the subtropical mixed plantations have strong conservation ability of community structure. These findings provide a theoretical basis for the management of subtropical mixed plantations.

Key words: mixed plantation, species diversity, community structure, basal area at the breast height, recovery characteristics

作为陆地生态系统的主体，森林在木材生产和减缓全球气候变暖等方面发挥着重要的缓冲和调节作用（刘世荣等，2018）。过去 20 年的遥感卫星观测结果表明，全球特别是亚洲和欧洲，陆地生态系统呈现出“变绿”现象（Chen et al., 2019）。在这种“变绿”现象的背后，全球森林和天然林的面积仍在下降，唯一增加的是人工林面积（Zhang et al., 2021）。根据第九次全国森林资源清查数据，2018 年我国人工林面积已达 7 954.28 万 hm^2，占同期全国林地森林面积 21 822.05 万 hm^2 的 36.45%，人工林面积持续稳居世界首位（国家林业和草原局，2019；崔海鸥等，2020）。然而长期以来，我国人工林经营偏重于同龄纯林的培育，由此加剧了诸如土壤退化、病虫害以及生态系统功能衰退等生态风险（Zhang et al., 2021）。现有研究表明，森林结构及其功能的恢复与生物多样性紧密关联（Lamb et al., 2005；Suding et al., 2015）。因此，在保护好现有天然林的同时，探讨人工林生物多样性的恢复过程有助于深入理解自然演替规律（陈幸良等，2014；Yao et al., 2019），对促进森林质量提升具有重要意义。

我国林业发展已迈入数量和质量并重的新阶段，森林质量提升将成为今后相当长一个时期内林业的目标和任务（张会儒等，2019）。在我国目前的人工林树种结构方面，杉木林以 990.20 万 hm^2 的面积和 75 545.01 万 m^3 的蓄积位列全国人工乔木林主要树种（组）首位（国家林业和草原局，2019）。对于广东省而言，其人工林的发展大致经历了 3 个阶段：（1）20 世纪 70 年代，大规模皆伐后飞机播种形成的马尾松（*Pinus massoniana*）林。这类森林大多由森林采伐后飞机播种马尾松种子等形成，在当时对荒山绿化发挥了重要作用。（2）20 世纪 80 年代至 2000 年，属于速生树种的快速发展阶段，如常见的杉木（*Cunninghamia lanceolata*）林、桉树（*Eucalyptus* spp.）林和相思（*Acacia* spp.）林等。（3）2000 年至今，属于多树种（乡土树种和珍贵树种）混交造林阶段，并已形成了较大面积的人工混交林（盘李军等，2023），为全省经济社会可持续发展提供了坚实的生态支撑。

人工林物种多样性恢复潜力及其对群落生产力的贡献已引起学术界的广泛关注（Huang et al., 2018；Bongers et al., 2021；Urgoiti et al., 2022）。相比天然林，关于人工林营建后自然演替的探讨多基于较小面积的样方取样开展工作，大多忽略了生物多样性恢复过程的空间尺度依赖性（盘李军等，2023）。此外，在空间尺度、生境条件以及群落复杂程度等的综合影响下，天然林物种多样性与群落生产力表现为“单峰”型、线性正相关、线性负相关、“U”型和不相关等模式（Huang et al., 2018；刘雅莉等，2023）。但基于天然林的研究结论是否适用于人工林仍有待检验。为了进一步验证物种多样性与群落生产力的关系，地跨亚热带到

寒温带等的全球森林研究网络逐渐形成（李珊等，2023）。基于中、德学者合作建立的世界上物种多样性梯度最广且造林面积最大的森林生物多样性与生态系统功能实验平台的监测研究发现，每公顷 16 个物种混交 8 年后，碳储量超过种植单一物种平均值的两倍，且这种促进作用亦会随森林恢复时间而增强（Huang et al., 2018）。然而，这种模拟物种丰富度试验能否代表真正的自然群落仍存在争议（Wardle, 2016；刘雅莉等，2023），有必要在人工林造林实践中加以验证。

广东省佛山市云勇林场从 2002 年起陆续对杉木纯林进行林分改造，以提升森林质量和生态效益（叶小萍等，2022；盘李军等，2023）。本文以云勇林场 2010 年对杉木纯林进行皆伐并种植阔叶乡土树种后形成的人工混交林为研究对象，基于 2020 年在典型区域建设的 7.92 hm^2 人工林样地群落调查数据，拟探讨如下科学问题：（1）人工混交林物种多样性恢复特征如何；（2）人工混交林群落结构是否稳定以及人为引入阔叶树种的更新情况如何；（3）人工混交林演替早期的物种多样性与胸高断面积之间存在何种关联。通过分析亚热带人工混交林自然演替 10 年后群落结构的恢复特征，以期为该区域人工林的生态修复提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

云勇林场位于广东省佛山市高明区明城镇甘蕉村，地理坐标为 112°38′26″—112°42′25″ E、22°41′54″—22°46′50″ N，总面积为 2 007.8 hm^2（叶小萍等，2022）。该区地处南亚热带季风气候区，年平均温度 22 ℃，年平均降水量约 2 000 mm，降水主要集中在 4—8 月（盘李军等，2021；李艳朋等，2024）。区域内最高峰为海拔 418.7 m 的鸡笼山，土壤 pH 值介于 5.5~6.0 之间，且主要以赤红壤为主（盘李军等，2013）。

1.2 样地建设与调查

自 2002 年开始，云勇林场陆续对不同林班中的杉木纯林进行皆伐，并通过引入阔叶乡土树种进行改造（叶小萍等，2022）。在 2010 年开展林分改造的典型区域，于 2020 年建立了 1 个面积为 7.92 hm^2 的样地（以下简称“云勇林场样地”），以期了解亚热带人工混交林群落结构和生态功能的恢复过程，为森林质量精准提升奠定理论基础。云勇林场样地严格参照美国史密森热带研究所（Smithsonian Tropical Research Institute）热带森林科学研究中心（Center for Tropical Forest Science）的调查技术规范（Condit, 1998）进行建设。该样地长 360 m，宽 220 m，共包含 198 个 20 m × 20 m 的样方。每个样方的四角均通过埋放 PVC 管并编号进行固定和识别，同时使用全站仪对样地的地形进行测量。为便于调查，每个 20 m × 20 m 样方均被划分为 16 个 5 m × 5 m 的小样方。对云勇林场样地内所有胸径（DBH，diameter at breast height）≥1.0 cm 的木本植株（包括木质藤本）进行挂牌，在高度 1.3 m 处涂上油漆，并记录种名、DBH、树高、坐标、分枝/萌条以及生长状况（李艳朋等，2016）。

通过查阅 2010 年林分改造的原始资料，初始林分改造过程共引入造林树种 15 科 23 属 31 种，具体信息见表 1。此外，杉木纯林皆伐后全部采用随机混交的形式进行改造，造林苗木均为 1~2 年生，平均苗木高约 60 cm，造林密度为 1 665 plant·hm^{-2}（盘李军等，2023）。

表 1 2020 年云勇林场样地物种信息表

Table 1 Species information of the Yunyong Forest Farm Plot in 2020

序号 No.	科名 Family name	属名 Genus name	物种名 Species name	独立植株数量 Number of independent plants	萌条数量 Number of sprouts	分枝数量 Number of branches	木本植物/藤本植物 Woody plant/Liana	人为引入物种/自然恢复物种 Artificially introduced species/Naturally recovery species
1	菊科 Asteraceae	艾纳香属 *Blumea*	艾纳香 *B. balsamifera*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
2	山茱萸科 Cornaceae	八角枫属 *Alangium*	八角枫 *A. chinense*	134	11	8	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
3	大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 *Mallotus*	白背叶 *M. apelta*	6	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
4	叶下珠科 Phyllanthaceae	白饭树属 *Flueggea*	白饭树 *F. virosa*	9	3	4	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
5	安息香科 Styracaceae	安息香属 *Styrax*	白花龙 *S. faberi*	10	9	9	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
6	报春花科 Primulaceae	酸藤子属 *Embelia*	白花酸藤果 *E. ribes*	2	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
7	五加科 Araliaceae	五加属 *Eleutherococcus*	白簕 *E. trifoliatus*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
8	鼠李科 Rhamnaceae	枳椇属 *Hovenia*	北枳椇 *H. dulcis*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
9	清风藤科 Sabiaceae	泡花树属 *Meliosma*	笔罗子 *M. rigida*	1	1	3	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
10	山茶科 Theaceae	山茶属 *Camellia*	茶 *C. sinensis*	2	0	3	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
11	樟科 Lauraceae	木姜子属 *Litsea*	豺皮樟 *L. rotundifolia* var. *oblongifolia*	13	10	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
12	樟科 Lauraceae	木姜子属 *Litsea*	潺槁木姜子 *L. glutinosa*	191	40	50	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
13	防己科 Menispermaceae	秤钩风属 *Diploclisia*	秤钩风 *D. affinis*	2	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
14	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 *Ilex*	秤星树 *I. asprella*	15	2	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
15	唇形科 Lamiaceae	大青属 *Clerodendrum*	臭茉莉 *C. chinense* var. *simplex*	7	0	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
16	锦葵科 Malvaceae	刺果麻属 *Ayenia*	刺果藤 *A. grandifolia*	1	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
17	蔷薇科 Rosaceae	李属 *Prunus*	刺叶桂樱 *P. spinulosa*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
18	五加科 Araliaceae	楤木属 *Aralia*	楤木 *A. elata*	29	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species

序号 No.	科名 Family name	属名 Genus name	物种名 Species name	独立植株数量 Number of independent plants	萌条数量 Number of sprouts	分枝数量 Number of branches	木本植物/藤本植物 Woody plant/Liana	人为引入物种/自然恢复物种 Artificially introduced species/Naturally recovery species
19	桑科 Moraceae	榕属 *Ficus*	粗叶榕 *F. hirta*	13	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
20	唇形科 Lamiaceae	大青属 *Clerodendrum*	大青 *C. cyrtophyllum*	7	3	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
21	芸香科 Rutaceae	花椒属 *Zanthoxylum*	大叶臭花椒 *Z. myriacanthum*	16	0	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
22	夹竹桃科 Apocynaceae	倒吊笔属 *Wrightia*	倒吊笔 *W. pubescens*	10	4	6	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
23	葡萄科 Vitaceae	地锦属 *Parthenocissus*	地锦 *P. tricuspidata*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
24	蔷薇科 Rosaceae	梨属 *Pyrus*	豆梨 *P. calleryana*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
25	桑科 Moraceae	榕属 *Ficus*	对叶榕 *F. hispida*	161	52	61	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
26	鼠李科 Rhamnaceae	勾儿茶属 *Berchemia*	多花勾儿茶 *B. floribunda*	1	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
27	五加科 Araliaceae	鹅掌柴属 *Heptapleurum*	鹅掌柴 *H. heptaphyllum*	792	207	233	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
28	五列木 Pentaphylacaceae	柃属 *Eurya*	二列叶柃 *E. distichophylla*	86	43	13	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
29	芸香科 Rutaceae	飞龙掌血属 *Toddalia*	飞龙掌血 *T. asiatica*	3	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
30	蕈树科 Altingiaceae	枫香树属 *Liquidambar*	枫香树 *L. formosana*	379	19	15	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
31	桑科 Moraceae	榕属 *Ficus*	高山榕 *F. altissima*	8	2	4	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
32	茜草科 Rubiaceae	钩藤属 *Uncaria*	钩藤 *U. rhynchophylla*	5	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
33	钩吻科 Gelsemiaceae	钩吻属 *Gelsemium*	钩吻 *G. elegans*	5	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
34	桑科 Moraceae	橙桑属 *Maclura*	构棘 *M. cochinchinensis*	4	3	6	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
35	番荔枝科 Annonaceae	瓜馥木属 *Fissistigma*	瓜馥木 *F. oldhamii*	1	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
36	木兰科 Magnoliaceae	含笑属 *Michelia*	观光木 *M. odora*	283	57	64	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
37	山矾科 Symplocaceae	山矾属 *Symplocos*	光叶山矾 *S.lancifolia*	2	4	7	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
38	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 *Ilex*	广东冬青 *I. kwangtungensis*	1	0	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
39	叶下珠科 Phyllanthaceae	土蜜树属 *Bridelia*	禾串树 *B. balansae*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
40	叶下珠科 Phyllanthaceae	黑面神属 *Breynia*	黑面神 *B. fruticosa*	12	0	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species

序号 No.	科名 Family name	属名 Genus name	物种名 Species name	独立植株数量 Number of independent plants	萌条数量 Number of sprouts	分枝数量 Number of branches	木本植物/藤本植物 Woody plant/Liana	人为引入物种/自然恢复物种 Artificially introduced species/Naturally recovery species
41	大戟科 Euphorbiaceae	山麻秆属 *Alchornea*	红背山麻秆 *A. trewioides*	5	0	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
42	壳斗科 Fagaceae	锥属 *Castanopsis*	红锥 *C. hystrix*	251	125	28	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
43	豆科 Fabaceae	猴耳环属 *Archidendron*	猴耳环 *A. clypearia*	1	2	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
44	豆科 Fabaceae	鱼藤属 *Derris*	厚果鱼藤 *D. taiwaniana*	42	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
45	紫草科 Boraginaceae	厚壳树属 *Ehretia*	厚壳树 *E. acuminata*	19	3	6	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
46	报春花科 Primulaceae	酸藤子属 *Embelia*	厚叶白花酸藤果 *E. ribes* var. *pachyphylla*	2	1	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
47	叶下珠科 Phyllanthaceae	算盘子属 *Glochidion*	厚叶算盘子 *G. hirsutum*	17	1	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
48	五列木 Pentaphylacaceae	柃属 *Eurya*	华南毛柃 *E. ciliata*	59	12	11	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
49	忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬属 *Lonicera*	华南忍冬 *L. confusa*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
50	芸香科 Rutaceae	吴茱萸属 *Tetradium*	华南吴萸 *T. austrosinense*	476	29	88	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
51	樟科 Lauraceae	润楠属 *Machilus*	华润楠 *M. chinensis*	30	19	5	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
52	桑科 Moraceae	榕属 *Ficus*	黄毛榕 *F. esquiroliana*	4	1	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
53	金丝桃科 Hypericaceae	黄牛木属 *Cratoxylum*	黄牛木 *C. cochinchinense*	8	2	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
54	樟科 Lauraceae	润楠属 *Machilus*	黄心树 *M. gamblei*	3	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
55	樟科 Lauraceae	樟属 *Camphora*	黄樟 *C. parthenoxylon*	3	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
56	五加科 Araliaceae	幌伞枫属 *Heteropanax*	幌伞枫 *H. fragrans*	6	3	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
57	唇形科 Lamiaceae	大青属 *Clerodendrum*	灰毛大青 *C. canescens*	3	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
58	木兰科 Magnoliaceae	木莲属 *Manglietia*	灰木莲 *M. glauca*	1 137	189	241	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
59	紫葳科 Bignoniaceae	火烧花属 *Mayodendron*	火烧花 *M. igneum*	4	1	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
60	报春花科 Primulaceae	杜茎山属 *Maesa*	鲫鱼胆 *M. perlarius*	169	42	85	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
61	茜草科 Rubiaceae	九节属 *Psychotria*	假九节 *P. tutcheri*	8	3	3	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species

序号 No.	科名 Family name	属名 Genus name	物种名 Species name	独立植株数量 Number of independent plants	萌条数量 Number of sprouts	分枝数量 Number of branches	木本植物/藤本植物 Woody plant/Liana	人为引入物种/自然恢复物种 Artificially introduced species/Naturally recovery species
62	锦葵科 Malvaceae	苹婆属 *Sterculia*	假苹婆 *S. lanceolata*	422	247	183	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
63	樟科 Lauraceae	木姜子属 *Litsea*	假柿木姜子 *L. monopetala*	129	24	15	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
64	番荔枝科 Annonaceae	假鹰爪属 *Desmos*	假鹰爪 *D. chinensis*	4	0	3	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
65	大麻科 Cannabaceae	朴属 *Celtis*	假玉桂 *C. timorensis*	2	1	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
66	蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 *Rosa*	金樱子 *R. laevigata*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
67	茜草科 Rubiaceae	九节属 *Psychotria*	九节 *P. asiatica*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
68	壳斗科 Fagaceae	锥属 *Castanopsis*	栲 *C. fargesii*	1	1	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
69	金缕梅科 Hamamelidaceae	壳菜果属 *Mytilaria*	壳菜果 *M. laosensis*	111	112	25	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
70	猕猴桃科 Actinidiaceae	猕猴桃属 *Actinidia*	阔叶猕猴桃 *A. latifolia*	2	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
71	桃金娘科 Myrtaceae	蒲桃属 *Syzygium*	阔叶蒲桃 *S. megacarpum*	1	1	6	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
72	芸香科 Rutaceae	花椒属 *Zanthoxylum*	簕欓花椒 *Z. avicennae*	163	65	49	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
73	瑞香科 Thymelaeaceae	荛花属 *Wikstroemia*	了哥王 *W. indica*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
74	壳斗科 Fagaceae	锥属 *Castanopsis*	黧蒴锥 *C. fissa*	50	17	4	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
75	芸香科 Rutaceae	吴茱萸属 *Tetradium*	楝叶吴萸 *T. glabrifolium*	535	56	53	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
76	豆科 Fabaceae	猴耳环属 *Archidendron*	亮叶猴耳环 *A. lucidum*	54	12	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
77	无患子科 Sapindaceae	龙眼属 *Dimocarpus*	龙眼 *D. longan*	1	0	3	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
78	无患子科 Sapindaceae	栾属 *Koelreuteria*	栾 *K. paniculata*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
79	报春花科 Primulaceae	紫金牛属 *Ardisia*	罗伞树 *A. quinquegona*	26	51	37	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
80	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 *Ilex*	绿冬青 *I. viridis*	3	1	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
81	豆科 Fabaceae	相思树属 *Acacia*	马占相思 *A. mangium*	2	0	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
82	买麻藤科 Gnetaceae	买麻藤属 *Gnetum*	买麻藤 *G. montanum*	15	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
83	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 *Ilex*	毛冬青 *I. pubescens*	26	8	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species

序号 No.	科名 Family name	属名 Genus name	物种名 Species name	独立植株数量 Number of independent plants	萌条数量 Number of sprouts	分枝数量 Number of branches	木本植物/藤本植物 Woody plant/Liana	人为引入物种/自然恢复物种 Artificially introduced species/Naturally recovery species
84	叶下珠科 Phyllanthaceae	算盘子属 *Glochidion*	毛果算盘子 *G. eriocarpum*	6	0	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
85	野牡丹科 Melastomataceae	野牡丹属 *Melastoma*	毛棯 *M. sanguineum*	68	2	10	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
86	壳斗科 Fagaceae	锥属 *Castanopsis*	毛锥 *C. fordii*	3	0	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
87	壳斗科 Fagaceae	锥属 *Castanopsis*	米槠 *C. carlesii*	468	193	133	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
88	樟科 Lauraceae	楠属 *Phoebe*	闽楠 *P. bournei*	28	0	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
89	山茶科 Theaceae	木荷属 *Schima*	木荷 *S. superba*	1 063	322	366	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
90	豆科 Fabaceae	南洋楹属 *Falcataria*	南洋楹 *F. falcata*	29	35	20	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
91	茜草科 Rubiaceae	耳草属 *Hedyotis*	牛白藤 *H. hedyotidea*	69	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
92	葡萄科 Vitaceae	牛果藤属 *Nekemias*	牛果藤 *N. cantoniensis*	3	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
93	木樨科 Oleaceae	素馨属 *Jasminum*	扭肚藤 *J. elongatum*	2	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
94	唇形科 Lamiaceae	紫珠属 *Callicarpa*	枇杷叶紫珠 *C. kochiana*	12	4	8	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
95	桑科 Moraceae	榕属 *Ficus*	苹果榕 *F. oligodon*	3	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
96	锦葵科 Malvaceae	破布叶属 *Microcos*	破布叶 *M. paniculata*	17	31	11	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
97	大麻科 Cannabaceae	朴属 *Celtis*	朴树 *C. sinensis*	3	2	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
98	漆树科 Anacardiaceae	漆树属 *Toxicodendron*	漆树 *T. vernicifluum*	35	8	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
99	菊科 Asteraceae	斑鸠菊属 *Strobocalyx*	茄叶斑鸠菊 *S. solanifolia*	4	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
100	壳斗科 Fagaceae	栎属 *Quercus*	青冈 *Q. glauca*	65	8	9	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
101	叶下珠科 Phyllanthaceae	叶下珠属 *Phyllanthus*	青灰叶下珠 *P. glaucus*	7	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
102	叶下珠科 Phyllanthaceae	秋枫属 *Bischofia*	秋枫 *B. javanica*	8	3	2	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
103	杨柳科 Salicaceae	脚骨脆属 *Casearia*	球花脚骨脆 *C. glomerata*	15	0	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
104	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 *Ilex*	三花冬青 *I. triflora*	3	1	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
105	芸香科 Rutaceae	蜜茱萸属 *Melicope*	三桠苦 *M. pteleifolia*	550	54	38	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species

序号 No.	科名 Family name	属名 Genus name	物种名 Species name	独立植株数量 Number of independent plants	萌条数量 Number of sprouts	分枝数量 Number of branches	木本植物/藤本植物 Woody plant/Liana	人为引入物种/自然恢复物种 Artificially introduced species/Naturally recovery species
106	杜英科 Elaeocarpaceae	杜英属 *Elaeocarpus*	山杜英 *E. sylvestris*	238	36	46	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
107	豆科 Fabaceae	葛属 *Pueraria*	山葛 *P. montana*	39	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
108	大麻科 Cannabaceae	山黄麻属 *Trema*	山黄麻 *T. tomentosa*	4	0	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
109	樟科 Lauraceae	木姜子属 *Litsea*	山鸡椒 *L. cubeba*	106	4	5	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
110	唇形科 Lamiaceae	牡荆属 *Vitex*	山牡荆 *V. quinata*	13	3	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
111	大戟科 Euphorbiaceae	乌桕属 *Triadica*	山乌桕 *T. cochinchinensis*	51	1	11	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
112	芸香科 Rutaceae	山油柑属 *Acronychia*	山油柑 *A. pedunculata*	1	0	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
113	柏科 Cupressaceae	杉木属 *Cunninghamia*	杉木 *C. lanceolata*	7 259	7 763	73	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
114	荚蒾科 Viburnaceae	荚蒾属 *Viburnum*	珊瑚树 *V. odoratissimum*	3	4	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
115	蔷薇科 Rosaceae	石斑木属 *Rhaphiolepis*	石斑木 *R. indica*	12	1	5	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
116	鼠刺科 Iteaceae	鼠刺属 *Itea*	鼠刺 *I. chinensis*	24	27	49	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
117	猕猴桃科 Actinidiaceae	水东哥属 *Saurauia*	水东哥 *S. tristyla*	122	125	61	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
118	茜草科 Rubiaceae	水锦树属 *Wendlandia*	水锦树 *W. uvariifolia*	177	74	68	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
119	桑科 Moraceae	榕属 *Ficus*	水同木 *F. fistulosa*	9	2	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
120	桃金娘科 Myrtaceae	蒲桃属 *Syzygium*	水竹蒲桃 *S. fluviatile*	4	4	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
121	荨麻科 Urticaceae	苎麻属 *Boehmeria*	水苎麻 *B. macrophylla*	9	7	7	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
122	报春花科 Primulaceae	酸藤子属 *Embelia*	酸藤子 *E. laeta*	234	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
123	夹竹桃科 Apocynaceae	水壶藤属 *Urceola*	酸叶胶藤 *U. rosea*	1	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
124	鼠李科 Rhamnaceae	枣属 *Ziziphus*	酸枣 *Z. jujuba* var. *spinosa*	1	5	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
125	叶下珠科 Phyllanthaceae	算盘子属 *Glochidion*	算盘子 *G. puberum*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
126	桑科 Moraceae	榕属 *Ficus*	台湾榕 *F. formosana*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
127	桃金娘科 Myrtaceae	桃金娘属 *Rhodomyrtus*	桃金娘 *R. tomentosa*	2	2	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species

序号 No.	科名 Family name	属名 Genus name	物种名 Species name	独立植株数量 Number of independent plants	萌条数量 Number of sprouts	分枝数量 Number of branches	木本植物/藤本植物 Woody plant/Liana	人为引入物种/自然恢复物种 Artificially introduced species/Naturally recovery species
128	桑科 Moraceae	构属 *Broussonetia*	藤构 *B. kaempferi*	76	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
129	豆科 Fabaceae	合欢属 *Albizia*	天香藤 *A. corniculata*	17	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
130	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 *Ilex*	铁冬青 *I. rotunda*	1	1	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
131	叶下珠科 Phyllanthaceae	土蜜树属 *Bridelia*	土蜜树 *B. tomentosa*	17	4	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
132	大戟科 Euphorbiaceae	乌桕属 *Triadica*	乌桕 *T. sebifera*	1	0	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
133	葡萄科 Vitaceae	乌蔹莓属 *Causonis*	乌蔹莓 *C. japonica*	1	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
134	无患子科 Sapindaceae	无患子属 *Sapindus*	无患子 *S. saponaria*	1	3	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
135	叶下珠科 Phyllanthaceae	五月茶属 *Antidesma*	五月茶 *A. bunius*	2	5	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
136	山茶科 Theaceae	木荷属 *Schima*	西南木荷 *S. wallichii*	5	0	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
137	五桠果科 Dilleniaceae	锡叶藤属 *Tetracera*	锡叶藤 *T. sarmentosa*	15	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
138	蓝果树科 Nyssaceae	喜树属 *Camptotheca*	喜树 *C. acuminata*	1	0	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
139	五列木科 Pentaphylacaceae	柃属 *Eurya*	细齿叶柃 *E. nitida*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
140	楝科 Meliaceae	香椿属 *Toona*	香椿 *T. sinensis*	6	2	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
141	樟科 Lauraceae	山胡椒属 *Lindera*	香叶树 *L. communis*	2	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
142	木樨科 Oleaceae	女贞属 *Ligustrum*	小蜡 *L. sinense*	3	1	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
143	樟科 Lauraceae	新木姜子属 *Neolitsea*	锈叶新木姜子 *N. cambodiana*	2	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
144	爵床科 Acanthaceae	爵床属 *Justicia*	鸭嘴花 *J. adhatoda*	3	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
145	壳斗科 Fagaceae	柯属 *Lithocarpus*	烟斗柯 *L. corneus*	10	0	1	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
146	漆树科 Anacardiaceae	盐麸木属 *Rhus*	盐麸木 *R. chinensis*	41	1	4	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
147	豆科 Fabaceae	黄檀属 *Dalbergia*	秧青 *D. assamica*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
148	夹竹桃科 Apocynaceae	羊角拗属 *Strophanthus*	羊角拗 *S. divaricatus*	9	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
149	野牡丹科 Melastomataceae	野牡丹属 *Melastoma*	野牡丹 *M. candidum*	1	2	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species

序号 No.	科名 Family name	属名 Genus name	物种名 Species name	独立植株数量 Number of independent plants	萌条数量 Number of sprouts	分枝数量 Number of branches	木本植物/藤本植物 Woody plant/Liana	人为引入物种/自然恢复物种 Artificially introduced species/Naturally recovery species
150	柿科 Ebenaceae	柿属 *Diospyros*	野柿 *D. kaki* var. *silvestris*	1	1	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
151	大戟科 Euphorbiaceae	野桐属 *Mallotus*	野桐 *M. tenuifolius*	2	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
152	樟科 Lauraceae	桂属 *Cinnamomum*	阴香 *C. burmanni*	3	0	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
153	叶下珠科 Phyllanthaceae	银柴属 *Aporosa*	银柴 *A. dioica*	191	72	75	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
154	豆科 Fabaceae	银合欢属 *Leucaena*	银合欢 *L. leucocephala*	4	2	2	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
155	山茶科 Theaceae	山茶属 *Camellia*	油茶 *C. oleifera*	31	62	12	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
156	叶下珠科 Phyllanthaceae	叶下珠属 *Phyllanthus*	余甘子 *P. emblica*	1	0	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
157	茜草科 Rubiaceae	玉叶金花属 *Mussaenda*	玉叶金花 *M. pubescens*	4	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
158	桑科 Moraceae	榕属 *Ficus*	杂色榕 *F. variegata*	107	167	83	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
159	樟科 Lauraceae	樟属 *Camphora*	樟 *C. officinarum*	139	28	22	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
160	紫草科 Boraginaceae	厚壳树属 *Ehretia*	长花厚壳树 *E. longiflora*	9	4	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
161	樟科 Lauraceae	润楠属 *Machilus*	浙江润楠 *M. chekiangensis*	2	1	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
162	豆科 Fabaceae	鱼藤属 *Derris*	中南鱼藤 *D. fordii*	1	0	0	藤本植物 Liana	自然恢复物种 Naturally recovery species
163	茜草科 Rubiaceae	猪肚木属 *Canthium*	猪肚木 *C. horridum*	4	2	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
164	红树科 Rhizophoraceae	竹节树属 *Carallia*	竹节树 *C. brachiata*	2	5	0	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
165	荨麻科 Urticaceae	苎麻属 *Boehmeria*	苎麻 *B. nivea*	20	0	5	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
166	壳斗科 Fagaceae	锥属 *Castanopsis*	锥 *C. chinensis*	14	0	0	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species
167	荨麻科 Urticaceae	紫麻属 *Oreocnide*	紫麻 *O. frutescens*	5	3	1	木本植物 Woody plant	自然恢复物种 Naturally recovery species
168	木兰科 Magnoliaceae	含笑属 *Michelia*	醉香含笑 *M. macclurei*	255	27	32	木本植物 Woody plant	人为引入物种 Artificially introduced species

1.3 数据分析

1.3.1 物种多样性的计算

使用 R 3.6.2 软件（R Core Team, 2017）的 vegan 包（Oksanen et al., 2013）对物种多样性进行计算。各物种多样性指数的计算公式（Hill, 1973；马克平等，1995）如下：

（1）Shannon-Wiener 多样性指数（H）：

$$H = -\sum_{i=1}^{s}(P_i \ln P_i)。$$

（2）Simpson 指数（D）：

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{s} {P_i}^2。$$

（3）Pielou 均匀度指数（E）：

$$E = \frac{H}{\ln(S)}。$$

式中：S 为每个 20 m × 20 m 样方内的物种数；P_i为每个 20 m × 20 m 样方内第 i 个物种的多度占所有物种多度之和的比例；n 为样方总数。

1.3.2 重要值的计算

根据云勇林场样地的调查数据，各物种重要值（IV，importance value）的计算公式（方精云等，2004）如下：

IV=（RB+RA+RF）/3。

式中：RB 为物种相对胸高断面积（relative basal area at the breast height）=（某一物种胸高断面积/所有物种胸高断面积之和）×100%；RA 为物种相对多度（relative abundance）=（某一物种个体数/所有物种个体数之和）×100%；RF 为物种相对频度（relative frequency）=（某一物种在 198 个 20 m × 20 m 样方中出现的次数/所有物种出现的次数之和）×100%。

1.3.3 胸高断面积的计算

胸高断面积（BA，basal area at the breast height）是群落生产力的潜在预测因子之一（Paquette & Messier, 2011；Hao et al., 2020）。通过计算每个 20 m × 20 m 样方内所有存活植株的胸高断面积之和，进而对群落生产力进行表征。

1.3.4 相关性分析

使用 R 3.6.2 软件（R Core Team, 2017）的 corrplot 包（Wei et al., 2021）进行相关性分析。在相关性分析前，使用 Shapiro-Wilk 检验分析每个变量的正态性。在确保各变量均满足正态分布的前提下，分析物种多度（SA，species abundance）、物种丰富度（SR，species richness）、H、D、E 与 BA 两两因子之间的 Pearson 相关系数，并使用 cor.test()函数检验相关系数的显著性（$P < 0.05$）。

2 结果与分析

2.1 物种多样性恢复情况

2020 年调查结果表明，云勇林场样地共记录到 30 938 个存活植株，其中包含 17 800 个独立植株，2 525 个分枝和 10 613 个萌条，隶属于 55 科 120 属 168 种。若排除造林初始阶段人为引入物种以及萌生的杉木，10 年的自然恢复过程中共有 47 科 101 属 136 种进入群落（表 1）。上述植株共包含乔灌本植物 51 科 100 属 146 种，藤本植物 14 科 21 属 22 种（表 1）。从物种—面积关系曲线可以看出，物种数量随着取样面积的增加而逐渐增大，即便当取样面积达到 7.92 hm^2 时，物种数量仍表现出增长趋势（图 1）。

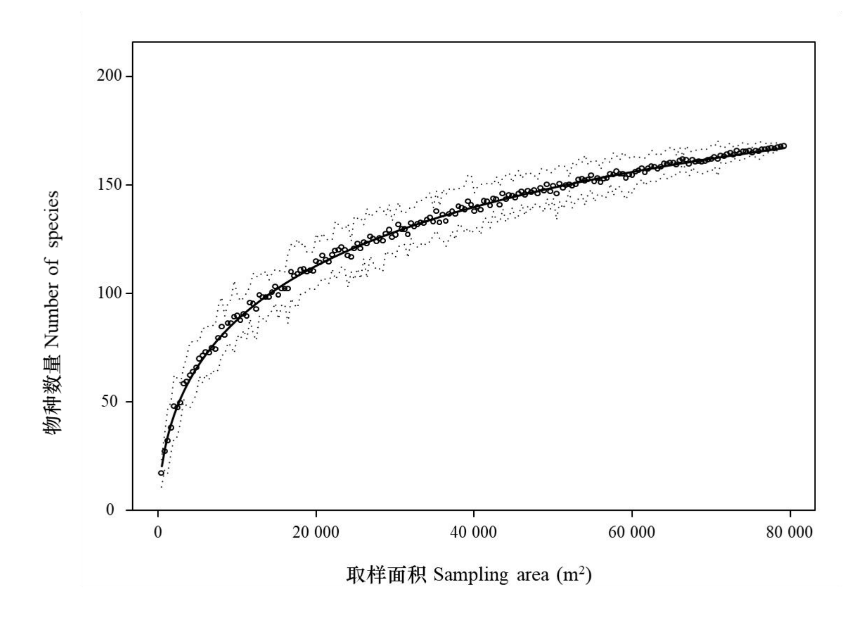


图 1 云勇林场样地物种—面积关系曲线

Fig. 1 The species–area relationship curve in the Yunyong Forest Farm Plot

云勇林场样地物种多度呈对数正态分布，主要表现为更多物种拥有较少的植株数量（图2）。若按照许涵等（2015）对稀有种（植株密度≤1 plant·hm^{-2}）、偶见种（1 plant·hm^{-2}<植株密度≤10 plant·hm^{-2}）和常见种（植株密度>10 plant·hm^{-2}）的划分方式，稀有种、偶见种和常见种在经过 10 年的自然恢复后分别为 89 种、50 种和 29 种（图 3），占总物种数的比例分别为 52.98%、29.76%和 17.26%。具体而言，稀有种、偶见种和常见种中自然恢复物种数量分别为 78 种、43 种和 15 种（图 3），占总物种数的比例分别为 46.43%、25.60%和 8.93%。

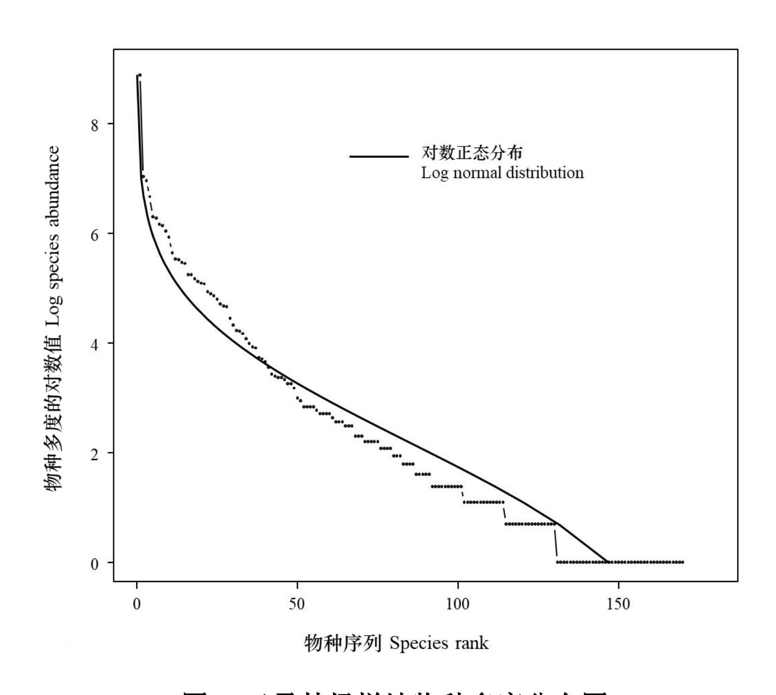


图 2 云勇林场样地物种多度分布图

Fig. 2 The species abundance distribution map in the Yunyong Forest Farm Plot

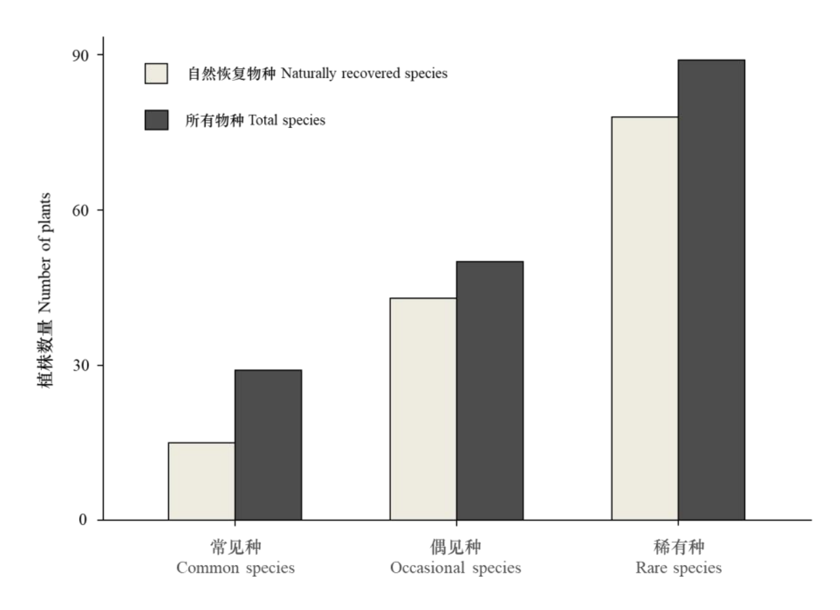


图 3 云勇林场样地常见种、偶见种和稀有种组成

Fig. 3 Composition of common species, occasional species and rare species in the Yunyong Forest Farm Plot

2.2 物种重要值

云勇林场样地内重要值前 10 位的树种依次为杉木、灰木莲（*Manglietia glauca*）、木荷（*Schima superba*）、楝叶吴萸（*Tetradium glabrifolium*）、鹅掌柴（*Heptapleurum heptaphyllum*）、华南吴萸（*Tetradium austrosinense*）、米槠（*Castanopsis carlesii*）、假苹婆（*Sterculia lanceolata*）、三椏苦（*Melicope pteleifolia*）和红锥（*Castanopsis hystrix*），它们的重要值之和为 65.29%（表 2）。其中，鹅掌柴、假苹婆和三椏苦为自然恢复物种（表 2）。

表 2 云勇林场样地优势种组成

Table 2 Dominant species of plants in the Yunyong Forest Farm Plot

种名 Species	重要值 Importance value (%)	相对胸高断面积 Relative basal area at the breast height (%)	相对多度 Relative abundance (%)	相对频度 Relative frequency (%)
杉木 *Cunninghamia lanceolata*	33.50	45.93	48.79	5.77
灰木莲 *Manglietia glauca*	7.70	14.00	5.06	4.02
木荷 *Schima superba*	4.52	4.69	5.66	3.22
楝叶吴萸 *Tetradium glabrifolium*	3.97	5.38	2.08	4.45
鹅掌柴 *Heptapleurum heptaphyllum*	3.27	0.93	3.98	4.91
华南吴萸 *Tetradium austrosinense*	3.20	5.72	1.92	1.96
米槠	2.87	3.38	2.57	2.67

Castanopsis carlesii				
假苹婆	2.42	1.86	2.75	2.64
Sterculia lanceolata				
三椏苦	2.25	0.50	2.08	4.18
Melicope pteleifolia				
红锥	1.58	1.90	1.31	1.54
Castanopsis hystrix				

2.3 物种多度和径级分布

经过 10 年的自然恢复，云勇林场样地的植株密度比初始造林阶段增长 34.95%，达到 2 247.47 plant·hm^{-2}。其中，杉木由于自然萌生能力较强，其植株密度增加 916.54 plant·hm^{-2}，初始人工林改造时人为引入物种密度降低为 723.23 plant·hm^{-2}，自然恢复物种密度增加 607.70 plant·hm^{-2}。

云勇林场样地内所有独立植株的平均 DBH 为 8.47 cm，径级分布总体呈现为倒“J”形（图 4）。DBH 小于等于 5.0 cm 的个体数量为 5 363 株，占独立植株总数的 30.13%；DBH 大于 5.0 cm 小于等于 10.0 cm 的个体数量为 6 087 株，占独立植株总数的 34.20%；DBH 大于 10.0 cm 小于等于 15.0 cm 的个体数量为 4 412 株，占独立植株总数的 24.79%，三者共占独立植株总数的 89.12%。

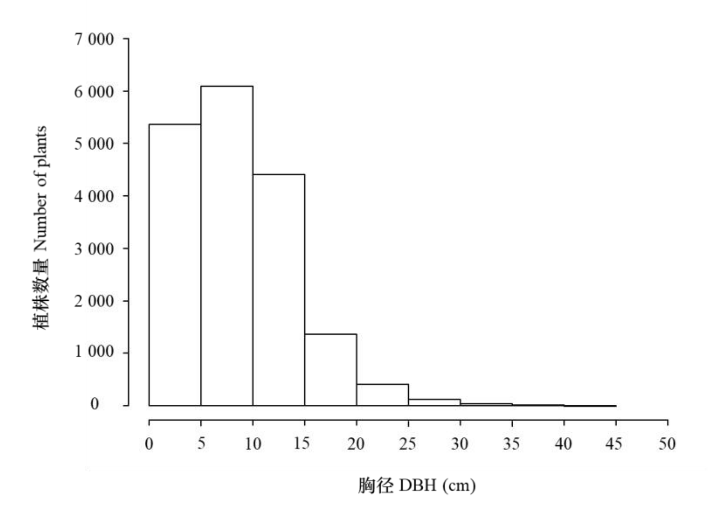


图 4 云勇林场样地独立植株胸径分布图

Fig. 4 Diameter distribution of the independent individuals in the Yunyong Forest Farm Plot

选取云勇林场样地初始人工林改造时人为引入个体数量较多的 9 个物种进行径级结构分析。总体而言，经过 10 年自然演替后各物种的径级分布主要表现为钟形曲线，即中等 DBH 个体数量较多，而小径级和大径级个体数量相对较少（图 5）。

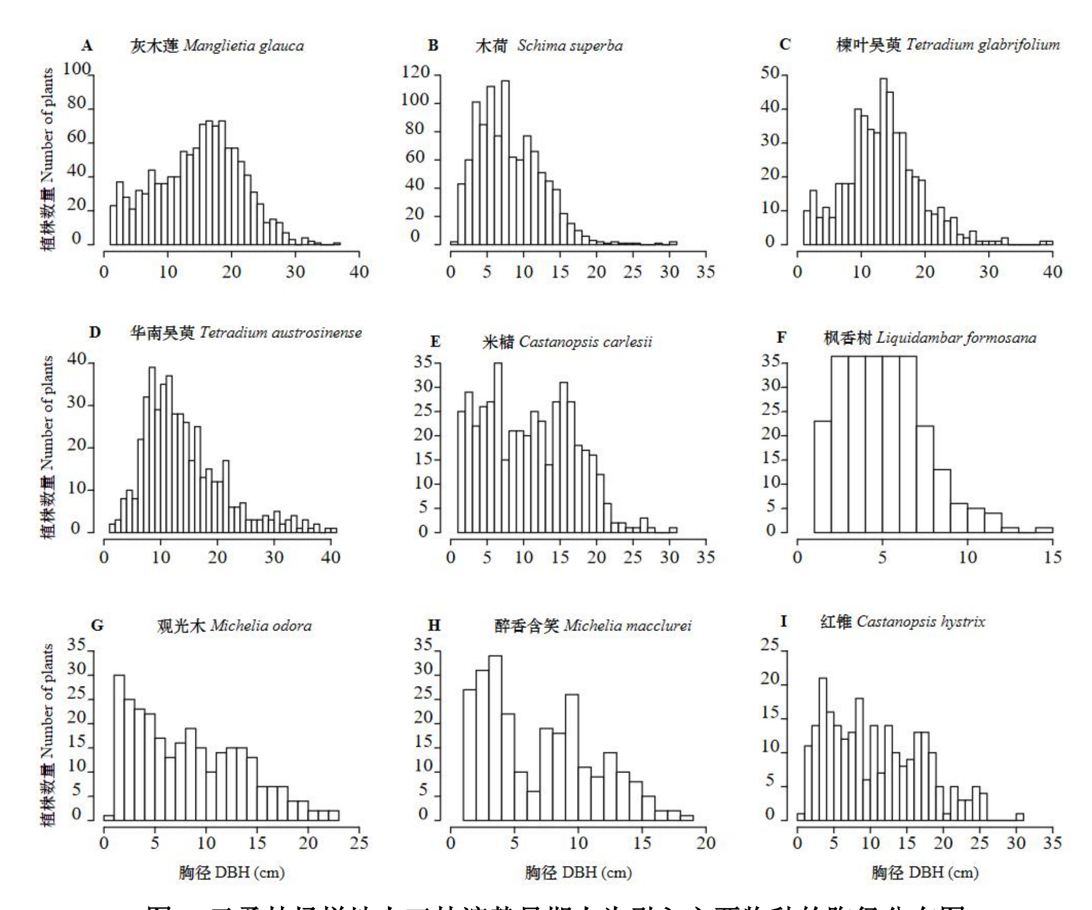


图 5 云勇林场样地人工林演替早期人为引入主要物种的胸径分布图

Fig. 5 DBH distribution of the main artificially introduced species at the beginning of planation in early succession in the Yunyong Forest Farm Plot

2.4 物种多样性与胸高断面积之间的关联

经过 10 年的自然恢复，仅物种多度与胸高断面积表现为较强的显著正相关关系，其余物种多样性指标均与胸高断面积表现为显著负相关关系（图 6）。此外，相比其他物种多样性指标，物种丰富度与胸高断面积的相关性相对较弱（图 6）。



对角线下的数字表示相关系数；对角线上的图形由椭圆形到圆形表示相关性逐渐降低。**SA**. 物种多度；**SR**. 物种丰富度；***H***. Shannon-Wiener 多样性指数；***D***. Simpson 指数；***E***. Pielou 均匀度指数；**BA**. 胸高断面积。The numbers below the diagonal indicate the correlation coefficient; the shapes above the diagonal from ellipse to circle indicate the correlation decreases gradually. **SA**. Species abundance; **SR**. Species richness; ***H***. Shannon-Wiener index; ***D***. Simpson index; ***E***. Pielou index; **BA**. Basal area at the breast height.

图 6 云勇林场样地物种多样性与胸高断面积的关联（*P* < 0.05）

Fig. 6 Correlation of species diversity and basal area at the breast height in the Yunyong Forest Farm Plot (*P* < 0.05)

3 讨论与结论

作为全球森林资源的重要组成部分，人工林在木材生产、景观营建以及减缓全球气候变化等方面具有重要作用（刘世荣等，2018）。然而，对于人工林特别是人工混交林究竟能维持多高的生物多样性水平（孟庆繁，1998）以及生物多样性对人工林生态功能的维持机制（Huang et al., 2018；Li et al., 2022）仍有待长期监测和深入研究。基于广东省佛山市云勇林场人工林改造后自然恢复 10 年的 7.92 hm^2 混交林样地群落调查数据，本研究发现亚热带人工混交林具有较强的群落结构恢复能力。此外，群落演替进程有望促进物种多样性与群落生产力的同步提升。

3.1 人工混交林的物种多样性恢复特征

云勇林场样地在经过 10 年的自然恢复后，共有 47 科 101 属 136 种木本植物进入群落并成功定植，表明亚热带人工混交林具有较强的物种多样性恢复能力。这种多样性恢复能力可以从物种数量、常见种、偶见种和稀有种比例以及生活型 3 个层面进行理解。在物种数量层面，人工林改造初始阶段人为引入物种以及自然恢复物种之和为 55 科 120 属 168 种，该数值已与同处于亚热带鼎湖山常绿阔叶林老龄林样地相同取样面积下的物种数量相当（叶万辉等，2008），并且当取样面积达到 7.92 hm^2 时，物种数量仍呈现出增长趋势。此外，常见种、偶见种和稀有种无论在数量还是占比方面均恢复良好。在生活型层面，除乔灌木外，累计有

14 科 21 属 22 种藤本植物进入群落并成功定植，这不仅实现了对群落内生态位的填充，对于人工混交林生态系统功能的恢复也具有重要意义。与传统观点普遍认为藤本植物与乔灌木在资源获取方面存在极强的竞争关系不同，Tang 等（2012）认为藤本植物具有将森林养分通过凋落物的形式向林窗和林缘等高光强生境转移的能力，这可能对热带亚热带森林高生产力的维持具有重要作用。

当前研究表明，稀有种在植被生态修复以及人工混交林营建等森林管理工作中具有重要应用价值（李意德等，2021）。作为热带亚热带森林生态系统中生物多样性维持的重要类群，稀有种的数量及比例是衡量生态恢复效果的重要指标之一（Snook et al., 2021）。在生境条件以及植被类型等的综合影响下，我国热带亚热带地区的稀有种比例介于 12%~50%（李意德等，2021）。对于云勇林场样地，本研究结果表明自然恢复 10 年后便有 78 种稀有种进入群落并成功定植，占总物种数的 46.43%，与同处于亚热带鼎湖山常绿阔叶林老龄林样地的稀有种比例相当（叶万辉等，2008），表明人工混交林在生物多样性保育方面的潜在价值不容忽视。

3.2 人工混交林物种重要值和径级结构恢复特征

云勇林场样地重要值排名前 10 位的树种中人为引入物种有 7 种，重要值达到 65.29%，表明人为引入物种对人工混交林早期演替阶段的群落结构具有重要影响。此外，自然恢复物种在经过 10 年的演替后同样具有成为优势种的潜力。例如鹅掌柴、假苹婆和三桠苦的重要值排名分别为第 5、第 8 和第 9，相对较小的种子使其更容易通过较高的相对多度和相对频度取得竞争优势（鲁强，2019；苏雨苗等，2019）。由此可见，差异化的竞争策略对于人工混交林物种多样性维持具有重要作用。

本研究结果表明，云勇林场样地所有独立植株的径级分布总体呈现为倒“J”形，表明群落更新良好且处于相对稳定状态（许涵等，2015）。此外，早期人为引入物种在自然演替过程中能否实现自然更新也是混交林营建成功与否的关键。对于云勇林场样地人为引入个体数量较多的 9 个物种而言，各物种均能实现自然更新。但由于恢复时间较短，其径级结构主要表现为钟形曲线，即中等 DBH 个体数量较多，而小径级和大径级个体数量相对较少。在 10 年的自然演替过程中，大多数个体尚未进入种子丰产期，真正意义的倒“J”形径级结构有望随着演替时间的增加得以改善。

造林密度是人工林培育成功与否的关键措施之一（王文俊等，2023）。合理的造林密度不仅有助于人工林的集约化经营和管理，其对局域群落小气候的快速改善作用也有助于促进生态修复（杨文海等，2024）。以往研究多通过比较不同造林密度下群落生产力的差异确定最优造林密度（王文俊等，2023）。但在我国人工林转向多目标经营的背景下，如何确定最优造林密度值得深入探讨（刘世荣等，2018）。本研究结果表明，对杉木纯林进行皆伐并引入阔叶树种自然恢复 10 年后，在不考虑萌生杉木的情况下，云勇林场样地阔叶树种经过原有个体死亡和自然更新后，密度减少 20.06%，即阔叶树种保存密度为 1 330.93 plant·hm^{-2}。因此，若单纯以人工林改造 10 年后阔叶树种的保存密度作为初始造林密度的依据，既能有效降低 20%的造林成本，同时也能够确保人工林恢复过程中维持合理的植株密度。需要说明的是，考虑到造林密度对植株生长、干形、生物量分配以及林内小气候等的影响，人工林营建初期往往保持相对较高的造林密度（郑颖等，2021）。本研究为人工林造林密度的选择提供了一种思路，具体造林密度的确定还需要综合多方面因素进行权衡。此外，地带性植被对于人工混交林的营建也具有重要参考价值（刘丹和于成龙，2017）。

3.3 人工混交林物种多样性与胸高断面积的关系

物种多样性常被用于群落生产力的预测，无论是基于全球天然林数据还是局部控制实验，均发现物种多样性对群落生产力具有促进作用（Liang et al., 2016；Bongers et al., 2021）。本研究表明，经过 10 年的自然恢复，云勇林场样地仅物种多度与胸高断面积表现为较强的显

著正相关关系，其余物种多样性指标均与胸高断面积表现为显著负相关关系，该结果可能与云勇林场样地较短的演替时间有关。尽管自然恢复物种数量随演替时间而增加，但该因素对群落生产力的短期贡献相对有限。相比群落演替过程中自然恢复物种，人工林改造初期人为引入物种占有更高的胸高断面积比例，其中重要值排名前 10 位物种的相对胸高断面积之和便高达 81.00%，表明人工混交林演替早期的群落生产力仍主要由造林初期人为引入物种决定。

本研究发现亚热带人工混交林具有较强的群落结构恢复能力，但群落生产力能否随着物种多样性同步提升仍有待未来的长期监测（Huang et al., 2018；Bongers et al., 2021；Urgoiti et al., 2022）。现有研究表明，生物多样性对群落生产力的影响，不仅归因于物种数量本身（Zhang et al., 2021），基于优势种的功能性状驱动群落生产力的质量比假说和功能多样性驱动群落生产力的生态位互补假说皆被广泛用于两者关系的机理性验证（Hao et al., 2018；Vargas-Larreta et al., 2021；Brun et al., 2022）。随着人工林演替进程中共存物种间生态位互补性的逐渐增强（Tilman et al., 2001；刘雅莉等，2023），有望促进物种多样性与群落生产力的同步提升。

参考文献：

BONGERS FJ, SCHMID B, BRUELHEIDE H, et al., 2021. Functional diversity effects on productivity increase with age in a forest biodiversity experiment [J]. Nature Ecology and Evolution, 5(12): 1594-1606.

BRUN P, VIOLLE C, MOUILLOT D, et al., 2022. Plant community impact on productivity: Trait diversity or key(stone) species effects? [J]. Ecology Letters, 25(4): 913-925.

CHEN C, PARK T, WANG XH, et al., 2019. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. Nature sustainability, 2(2): 122-129.

CHEN XL, JU Q, LIN KL, 2019. Development status, issues and countermeasures of China's plantation [J]. World Forestry Research, 27(6): 54-59. [陈幸良，巨茜，林昆仑，2014. 中国人工林发展现状、问题与对策 [J]. 世界林业研究，27(6)：54-59.]

CONDIT R, 1998. Tropical Forest census plots: methods and results from Barro Colorado Island, Panama and a comparison with other plots [M]. Berlin: Springer: 1-211.

CUI HO, LIU M, 2020. Analysis on the results of the 9th national forest inventory [J]. Journal of West China Forestry Science, 49(5): 90-95. [崔海鸥，刘珉，2020. 我国第九次森林资源清查中的资源动态研究 [J]. 西部林业科学，49(5)：90-95.]

FANG JY, LI YD, ZHU B, et al., 2004. Community structures and species richness in the montane rain forest of Jianfengling, Hainan Island, China [J]. Biodiversity Science, 12(1): 29-43. [方精云，李意德，朱彪，等，2004. 海南岛尖峰岭山地雨林的群落结构、物种多样性以及在世界雨林中的地位 [J]. 生物多样性，12(1)：29-43.]

HAO MH, MESSIER C, GENG Y, et al., 2020. Functional traits influence biomass and productivity through multiple mechanisms in a temperate secondary forest [J]. European Journal of Forest Research, 139(6): 959-968.

HAO MH, ZHANG CY, ZHAO XH, et al., 2018. Functional and phylogenetic diversity determine woody productivity in a temperate forest [J]. Ecology and Evolution, 8(5): 2395-2406.

Hill MO, 1973. Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences [J]. Ecology, 54(2): 427-432.

HUANG YY, CHEN YX, CASTRO-IZAGUIRRE N, et al., 2018. Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment [J]. Science, 362(6410): 80-83.

LAMB D, ERSKINE PD, PARROTTA JA, 2005. Restoration of degraded tropical forest landscapes [J]. Science, 310(5754): 1628-1632.
LI S, LIU XJ, MA KP, 2023. Research progress of Biodiversity-Ecosystem Functioning Experiment China Platform (BEF-China) [J]. Guihaia, 43(8): 1524-1536. [李珊，刘晓娟，马克平，2023. 亚热带森林生物多样性与生态系统功能实验研究基地(BEF-China)研究进展 [J]. 广西植物，43(8)：1524-1536.]
LI X, WANG H, LUAN JW, et al., 2022. Functional diversity dominates positive species mixture effects on ecosystem multifunctionality in subtropical plantations [J]. Forest Ecosystems, 9: 100039.
LI YD, CHEN J, XU H, et al., 2021. Rare species regulation mechanism of natural recovery and the implications on ecological restoration in tropical and subtropical forests [J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2021, 1(1): 1-11. [李意德，陈洁，许涵，等，2021. 稀有物种的调控机制及其在生态修复中的应用启示 [J]. 陆地生态系统与保护学报，1(1)：1-11.]
LI YP, PAN LJ, CHEN J, et al., 2024. Response and influencing factors of leaf functional traits to forest succession in subtropical mixed plantations [J]. Biodiversity Science, 32(7): 6-18. [李艳朋，盘李军，陈洁，等，2024. 亚热带人工混交林叶功能性状对森林演替的响应规律及影响因素 [J]. 生物多样性，32(7)：6-18.]
LI YP, XU H, LI YD, et al., 2016. Scale-dependent spatial patterns of species diversity in the tropical montane rain forest in Jianfengling, Hainan Island, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 40(9): 861-870. [李艳朋，许涵，李意德，等，2016. 海南尖峰岭热带山地雨林物种多样性空间分布格局的尺度效应 [J]. 植物生态学报，40(9)：861-870.]
LIANG JJ, CROWTHER TW, PICARD N, et al., 2016. Positive biodiversity- productivity relationship predominant in global forests [J]. Science, 354(6309): aaf8957.
LIU D, YU CL, 2017. Effects of climate change on the distribution of main vegetation types in Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 37(19): 6511-6522. [刘丹，于成龙，2017. 气候变化对东北主要地带性植被类型分布的影响 [J]. 生态学报，37(19)：6511-6522.]
LIU SR, YANG YJ, WANG H, 2018. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 38(1): 1-10. [刘世荣，杨予静，王晖，2018. 中国人工林经营发展战略与对策：从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营 [J]. 生态学报，38(1)：1-10.]
LIU YL, WU Y, GU P, et al., 2023. Progress and future direction of biodiversity-productivity relationship research [J]. Acta Ecologica Sinica, 43(18): 7782-7795. [刘雅莉，吴俣，顾盼，等，2023. 生物多样性-生产力关系研究进展—基于文献计量分析 [J]. 生态学报，43(18)：7782-7795.]
LU Q, 2019. Study on the methods and preliminary mechanism of seed dormancy release of *Melicope pteleifolia* [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine. [鲁强，2019. 三桠苦种子休眠的解除方法和初步机理研究 [D]. 广州：广州中医药大学.]
MA KP, HUANG JH, YU SL, et al., 1995. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II, species richness, evenness and species diversities [J]. Acta Ecologica Sinica, 15(3): 268-277. [马克平，黄建辉，于顺利，等，1995. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究：II 丰富度、均匀度和物种多样性 [J]. 生态学报，15(3)：268-277.]
MENG QF, 1998. Current status and prospect of the study on biodiversity of plantation forests [J]. World Forestry Research(2): 27-32. [孟庆繁，1998. 人工林生物多样性研究的现状及展望

[J]. 世界林业研究(2)：27-32.]
OKSANEN J, BLANCHET F, KINDT R, et al., 2013. vegan: Community ecology package [J]. R Package Version 2.0–10. https://cran.r-project.org/src/contrib/Archive/vegan/. (accessed on 2023-07-18).
PAN LJ, HE ZL, XIAN WG, et al., 2021. Species composition of rebuilding *Cunninghamia lanceolata* ecological public welfare forests in Yunyong forest park, Foshan [J]. Forestry and Environmental Science, 37(3): 68-74. [盘李军，何增丽，冼伟光，等，2021. 云勇森林公园杉木生态公益林改造后群落物种组成 [J]. 林业与环境科学，37(3)：68-74.]
PAN LJ, XU H, LI YP, et al., 2023. The effects of configuration modes of different trees on the restoration of species diversity and functional diversity in planted forests [J]. Forestry and Environmental Science, 39(1): 55-64. [盘李军，许涵，李艳朋，等，2023. 不同树种配置模式对人工林物种和功能多样性恢复的影响 [J]. 林业与环境科学，39(1)：55-64.]
PAN LJ, WANG MH, XIAN GB, et al., 2013. Preliminary study about tree selection and configuration of Yunyong ecological forest [J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 29(5): 1-6. [盘李军，王明怀，冼干标，等，2013. 云勇生态公益林树种选择及配置研究初报 [J]. 广东林业科技，29(5)：1-6.]
PAQUETTE A, MESSIER C, 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests [J]. Global Ecology and Biogeography, 20(1): 170-180.
R Core Team, 2017. R, a language and environment for statistical computing [J]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. https://www.r-project.org/. (accessed on 2023-07-18).
SNOOK LK, CAPITANIO R, TADEO-NOBLE A, 2021. Restoring commercial timber species through silvicultural patch clear-cuts and natural regeneration in Mexico’s Maya Forest: Composition and growth 11 years after three treatments [J]. Forest Ecology and Management, 493: 119206.
State Administration of Forestry and Grassland, 2019. China Forest Resources Report (2014-2018) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House: 1-451. [国家林业和草原局，2019. 中国森林资源报告(2014–2018). 北京：中国林业出版社：1-451.]
SUDING K, HIGGS E, PALMER M, et al., 2015. Committing to ecological restoration [J]. Science, 348(6235): 638-640.
SU YM, CHEN SM, DU Q, et al., 2019. Identification of *Sterculia nobilis* Smith and *Sterculia lanceolata* Cav. [J]. Journal of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, 36(3): 414-419. [苏雨苗，陈诗敏，杜勤，等，2019. 苹婆与假苹婆的比较鉴别研究 [J]. 广州中医药大学学报，36(3)：414-419.]
TILMAN D, REICH PB, KNOPS J, et al., 2001. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment [J]. Science, 194(5543): 843-835.
URGOITI J, MESSIER C, KEETON, WS, et al., 2022. No complementarity no gain–Net diversity effects on tree productivity occur once complementarity emerges during early stand development [J]. Ecology Letters, 25(4): 851-862.
VARGAS-LARRETA B, LÓPEZ-MARTÍNEZ JO, GONZÁLEZ EJ, et al., 2021. Assessing above-ground biomass-functional diversity relationships in temperate forests in northern Mexico [J]. Forest Ecosystems, 8(1): 1-14.
WANG WJ, LI LF, LI XJ, et al., 2023. Response of growth to density for a 21-year-old *Betula alnoides* plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 43(11): 44-52. [王文俊，李莲芳，李小军，等，2023. 西南桦 21 年生人工林生长对造林密度的

响应 [J]. 中南林业科技大学学报，43(11)：44-52.]

WARDLE DA, 2016. Do experiments exploring plant diversity–ecosystem functioning relationships inform how biodiversity loss impacts natural ecosystems? [J]. Journal of Vegetation Science, 27(3): 646-653.

WEI TY, SIMKO V, LEVY M, et al., 2021. R package ‘corrplot’: Visualization of a correlation matrix [J]. R Package Version 0.92. https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/index.html. (accessed on 2023-07-18)

XU H, LI YD, LIN MX, et al., 2015. Community characteristics of a 60 ha dynamics plot in the tropical montane rain forest in Jianfengling, Hainan Island [J]. Biodiversity Science, 23(2): 192-201. [许涵，李意德，林明献，等，2015. 海南尖峰岭热带山地雨林 60 ha 动态监测样地群落结构特征 [J]. 生物多样性，23(2)：192-201.]

YANG WH, YANG ZL, WANG YH, et al., 2024. Microclimate features of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in the Liupan Mountains of northwestern China [J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 4(2): 32-41. [杨文海，杨志莲，王彦辉，等，2024. 六盘山区华北落叶松人工林小气候特征 [J]. 陆地生态系统与保护学报，4(2)：32-41.]

YAO XY, LI YF, LIAO LN, et al., 2019. Enhancement of nutrient absorption and interspecific nitrogen transfer in a *Eucalyptus urophylla* × *eucalyptus grandis* and *Dalbergia odorifera* mixed plantation [J]. Forest Ecology and Management, 449: 117465.

YE WH, CAO HL, HUANG ZL, et al., 2008. Community structure of a 20 hm^2 lower subtropical evergreen broadleaved forest plot in Dinghushan, China [J]. Journal of Plant Ecology, 32(2): 274-286. [叶万辉，曹洪麟，黄忠良，等，2008. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林 20 公顷样地群落特征研究 [J]. 植物生态学报，32(2)：274-286.]

YE XP, PAN LJ, XU H, et al., 2022. Study on the dynamic changes of species composition and diversity of the rebuilt ecological public welfare forests [J]. Forestry and Environmental Science, 38(5): 105-112. [叶小萍，盘李军，许涵，等，2022. 生态公益林改造后物种组成和多样性动态变化研究 [J]. 林业与环境科学，38(5)：105-112.]

ZHANG HR, LEI XD, ZHANG CY, et al., 2019. Research on theory and technology of forest quality evaluation and precision improvement [J]. Journal of Beijing Forestry University, 41(5): 1-18. [张会儒，雷相东，张春雨，等，2019. 森林质量评价及精准提升理论与技术研究 [J]. 北京林业大学学报，41(5)：1-18.]

ZHANG J, FU BJ, STAFFORD-SMITH M, et al., 2021. Improve forest restoration initiatives to meet sustainable development goal 15 [J]. Nature Ecology & Evolution, 5(1): 10-13.

ZHENG Y, FENG J, YU SH, et al., 2021. Effects of initial planting density on growth and stem form of four *Larix* clones [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 45(6): 72-80. [郑颖，冯健，于世河，等，2021. 初植密度对 4 个落叶松无性系生长与干形的影响 [J]. 南京林业大学学报（自然科学版），45(6)：72-80.]